کاربرد مقاومت الکتریکی برای بررسی پایایی بتن*

امیررضا پیلوار[۱] علی اکبر رمضانیان‌پور[۲] مهدی مهدی‌خانی[۳] فرامرز مودی[٤]

چکیده *یکی از عوامل اصلی خرابی زودرس در سازه‌های بتن مسلح، خوردگی میل‌گردها می‌باشد و مهم‌ترین عامل در افزایش سرعت این تخریب نفوذپذیری بتن به‌شمار می‌رود. از سوی دیگر، روش‌های مختلفی برای ارزیابی نفوذپذیری بتن وجود دارد. با تعیین رابطه‌ای بین این روش‌ها می‌توان مهندسان را در انتخاب روش مناسب ارزیابی و درک به‌تر مکانیزم آن‌ها یاری رساند. مقاومت الکتریکی بتن شاخصی مناسب برای ارزیابی نفوذپذیری بتن و مقاومت آن در مقابل نفوذ یون کلراید می‌باشد. این روش کاملاً غیرمخرب است و سادگی، سرعت و اقتصادی بودن آن بر کاربرد این روش می‌افزاید. در این تحقیق، به‌منظور یافتن رابطه‌ای مناسب میان مقاومت الکتریکی و نفوذپذیری بتن (مانند نفوذ آب و نفوذ یون کلراید)، آزمایش‌های گوناگونی بر روی ۷۲ طرح اختلاط بتن، انجام شده و روابط میان آن‌ها بیان گردیده است. علاوه بر آن، عوامل تأثیرگذار بر نتایج آزمایش‌ها بیان شده و در مورد محدودیت‌های موجود در برقراری ارتباط بین آن‌ها بحث شده است. نتایج نشان‌دهنده‌ی وجود رابطه‌ی توانی مناسبی میان مقاومت الکتریکی بتن و نفوذپذیری آن می‌باشد. در نتیجه، از نتایج این تحقیق می‌توان دریافت که با دقت مناسبی می‌توان از آزمایش مقاومت الکتریکی به‌منظور تعیین میزان نفوذپذیری نمونه‌های بتنی استفاده نمود.*

واژه‌های کلیدی مقاومت الکتریکی، نفوذ پذیری، خوردگی، ریزساختار، دوام، نفوذ تسریع شده یون کلراید.

Using Resistivity to Evaluate Durability of Concrete

A.R. Pilvar A.A. Ramezanianpour M. Mahdikhani F. Moodi

Abstract *One of the main factors of premature deterioration of concrete structures is the corrosion of reinforcements. Chloride penetration of concrete is one of the main reasons of this phenomenon. Therefore, to have durable structure, it is necessary to have concretes with low permeability.There are various methods to evaluate permeability of concrete. Finding a relationship between them can be useful for understanding the mechanism of corrosion. Concrete resistivity test is a suitable indicator for concrete penetration and chloride ion permeability. It is a non-destructive, simple, rapid and cheep method that can also be used in site.In this study, various permeability and resistivity tests were carried out on different types of concrete to find a relationship between them. In addition, the main factors affected the resistivity are disgusted and the major constraints of relation between resistivity and permeability of concrete are illustrated. Finally, a new method is recommended to eliminate these problems.*

Keywords resistivity, permeability, corrosion, microstructure, durability, RCPT

★تاریخ دریافت مقاله ۹۰/۸/۱۷ و تاریخ پذیرش آن ۹۱/۸/۱۰ می‌باشد.

(۱) نویسنده‌ی مسؤول، دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

(۲) استاد دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

(۳) دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

(٤) استادیار دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

مقدمه

یکی از عوامل خرابی زودرس سازه‌های بتن‌آرمه، خوردگی فولادهای آن می‌باشد و این مسأله از مهم‌ترین مشکلاتی است که صنعت ساخت و ساز، در رابطه با دوام، با آن مواجه است [1]. معمولاً خوردگی آرماتورها، ناشی از بین رفتن لایه‌ی محافظ (Passive) روی آرماتورها به‌دلیل نفوذ یون کلراید و یا کربناتاسیون و تشکیل میکروپیل‌های خوردگی می‌باشد. یون‌های کلراید محلول در آب ناشی از استفاده از نمک‌های یخزدا، یون‌های موجود درون خاک، آب دریاها و آب‌های زیرزمینی می‌توانند به بتن نفوذ کنند و به سطح آرماتور برسند. مکانیزم اصلی انتقال یون‌های کلراید در سطح بتن، مخصوصاً وقتی این سطح غیر اشباع باشد، جذب موئینه می‌باشد و تجمع این یون‌ها در لایه‌های سطحی بتن باعث انتقال یون‌ها به‌صورت انتشار به لایه‌های زیرین می‌شود [2]. بنابراین انتشار، مکانیزم اصلی جابه‌جایی یون‌ها در لایه‌های زیرین بتن می‌باشد. نیروی رانش در انتشار یون‌های کلراید، اختلاف غلظت بین یون‌ها در قسمت‌های مختلف بتن می‌باشد[3]. روش‌های مختلفی برای ارزیابی نفوذ یون کلراید به بتن وجود دارد. در روش‌هایی که فقط بر پایه‌ی انتشار می‌باشند، محدودیت‌هایی وجود دارد. از جمله این محدودیت‌ها، زمان طولانی مورد نیاز برای رسیدن انتشار یون‌های کلراید به حالت پایدار می‌باشد. بنابراین، این روش‌ها برای ارزیابی مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون کلراید، عملی نمی‌باشند[4]. در نتیجه، محققان به‌دنبال پیدا کردن روش‌های تسریع‌یافته هستند. به‌عنوان مثال عمل انتشار در روشی که توسط Alexander و Streicher [5]، بیان شده است به‌وسیله‌ی کاهش ضخامت نمونه‌ها و هم‌چنین افزایش غلظت یون‌های کلراید در یک طرف نمونه، تسریع یافته است. از دهه‌ی ۱۹۷۰ سازمان‌ها و متخصصان سعی کرده‌اند که روش سریع، ارزان و قابل اعتمادی پیشنهاد دهند تا بتوانند میزان مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون کلراید را اندازه‌گیری نمایند. در اواخر دهه‌ی ۱۹۷۰، Whiting[6, 7]، روشی به این منظور معرفی کرد که با نام روش نفوذ تسریع شده‌ی یون کلراید (RCPT) شناخته شده است. اما این روش در واقع رسانایی نمونه‌ها را اندازه‌گیری می‌کند. این روش توسط AASHTO در سال ۱۹۸۳ و ASTM در سال ۱۹۹۱ به‌صورت استاندارد آورده شده است.

این روش به‌عنوان شاخصی الکتریکی برای ارزیابی بتن در مقابل نفوذ یون کلراید، میزان جریان عبوری از نمونه‌ها را در طول مدت ٦ ساعت وقتی اختلاف پتانسیل ٦۰ ولت برقرار باشد اندازه‌گیری می‌کند[8]. میزان جریان اندازه‌گیری شده در مقابل زمان، با هم جمع می‌شود و میزان کل بار عبوری در واحد کلمب به‌دست می‌آید. پنج سطح برای ارزیابی بتن براساس میزان بار عبوری مشخص شده است: زیاد، متوسط، کم، خیلی کم و قابل چشم پوشی.

هرچند روش RCPT به‌دلیل آسانی آن بسیار مورد استفاده قرار گرفته است، اما در مجامع علمی انتقاداتی نیز به آن وارد شده است[9]. RCPT روشی شاخص است که در آن شرایط پایداری وجود ندارد. بدان معنی که برای دستیابی به انتشار پایدار، می‌بایست شرایطی ایجاد شده باشد که یون‌های کلراید از یک سوی نمونه به‌سوی دیگر آن رسیده باشند که برای حصول این شرط، نیاز به مدت زمان طولانی است. لیکن در روش RCPT اندازه‌گیری از همان لحظه شروع انجام آزمایش آغاز می‌گردد. مشکل دیگری که در روش RCPT وجود دارد، حرارت به‌وجود آمده در طول انجام آزمایش می‌باشد[10]. هم‌چنین تغییراتی که در مشخصات مایع منفذی زمانی‌که از مواد پوزولانی استفاده می‌شود، به‌وجود می‌آید باعث عدم اطمینان به نتایج RCPT می‌شود. به‌علاوه به دلیل ولتاژ نسبتاً زیاد ٦۰ ولت، جریان برقرار شده در حالت پایداری قرار نمی‌گیرد[11]. در نتیجه ممکن است نتایج به‌دست آمده به‌درستی بیانگر انتشار یون کلراید نباشد.

از طرفی دیگر، مقاومت الکتریکی بتن یکی از خواص ذاتی مستقل بتن می‌باشد که به‌میزان رطوبت بتن و ترکیبات آن بستگی دارد [12]. از تحقیقات تئوری و کارهای آزمایشگاهی انجام‌شده مشخص است که بین مقاومت الکتریکی بتن و نفوذ یون‌های کلراید رابطه‌ای وجود دارد [13-15]. در حالت کلی، ضریب نفوذ یون کلراید به‌طور عکس با مقاومت الکتریکی بتن رابطه دارد. در یک ساختار مشخص، قسمت‌های نفوذپذیرتر دارای مقاومت الکتریکی نسبی کم‌تر و نفوذ یون کلراید بالاتر می‌باشد. هم‌چنین مقاومت الکتریکی با میزان خوردگی آرماتور بعد از شروع خوردگی در ارتباط است. انتقال یون‌ها بین آند و کاتد در سطح آرماتور یکی از عوامل کنترلی میزان خوردگی می‌باشد[12].

یکی از به‌ترین روش‌ها برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی بتن، استفاده از دستگاه چهار الکترودی Wenner می‌باشد. این روش غیر مخرب، سریع و به‌سادگی قابل استفاده می‌باشد و به همین دلیل این روش را می‌توان شاخصی برای ارزیابی بتن از لحاظ نفوذ یون کلراید در نظر گرفت. این وسیله دارای چهار الکترود با فواصل مساوی است که با سطح بتن در تماس قرار می‌گیرد[16].

عامل اصلی دیگری که در دوام بتن نقش دارد، نفوذپذیری آن می‌باشد. بتن با نفوذپذیری پایین در مقابل حملات شیمیایی مقاومت به‌تری نشان می‌دهد. هنگامی که آب به داخل بتن نفوذ می‌کند مقداری نمک‌های محلول را به‌همراه خود به داخل بتن حمل می‌کند و وقتی این نمک‌ها به سطح آرماتور برسند، باعث خوردگی می‌شوند. در حالت کلی نفوذپذیری کم‌تر باعث دوام بیش‌تر بتن می‌باشد. روش‌های مختلفی مانند آزمایش نفوذ آب، برای ارزیابی نفوذپذیری بتن مورد استفاده قرار می‌گیرند و تحقیقات بسیاری درباره‌ی آن انجام شده و اعتبار این روش‌ها تأیید شده است[17,18].

هدف از این تحقیق بررسی این موضوع است که آیا می‌توان مقاومت الکتریکی بتن را به‌عنوان جایگزینی برای روش‌های RCPT و عمق نفوذ آب در نظر گرفت و آن را به‌عنوان شاخصی برای مقاومت بتن در مقابل نفوذ یون کلراید شناخت؟

برنامه‌ی آزمایشگاهی

مواد و طرح اختلاط. در این تحقیق در مجموع ۷۲ طرح اختلاط ساخته شد و مورد بررسی قرار گرفت. خلاصه طرح‌های اختلاط و هم‌چنین سنین انجام هر آزمایش در جدول (۱) آورده شده است. برای ساخت نمونه‌های بتنی از سیمان تیپ۱ استفاده شده و مواد جایگزین سیمان مورد استفاده شامل ۲ پوزولان طبیعی توف (Tuff) و پومیس (Pumice) و هم‌چنین پوزولان‌های خاکستر پوسته‌ی برنج (RHA)، ۳ نوع متاکائولن (Metakaolin) و دوده سیلیس (SF) به‌علاوه پودر سنگ آهک می‌باشد. در جدول (۲) ترکیبات شیمیایی این مواد آورده شده است. برای تمامی طرح‌ها از سنگ‌دانه‌ی درشت شکسته شده با حداکثر قطر ۱۹ میلی‌متر و سنگدانه‌ی ریز طبیعی به‌عنوان ماسه استفاده شده است. برای رسیدن به کارایی مطلوب از فوق روان‌کننده در حد نیاز استفاده شده است. برای ساخت و عمل‌آوری نمونه‌های بتنی از آب شرب شهر تهران استفاده شده است. قابل ذکر است که اندازه‌گیری تمامی نسبت‌ها وزنی بوده است.

نحوه‌ی انجام آزمایش‌ها و آماده‌سازی نمونه‌ها. برای خروج حباب‌های هوا و تراکم بتن، از میز ویبره استفاده شده است. بعد از بتن‌ریزی در قالب‌ها، برای ۲۴ ساعت آن‌ها را توسط حوله‌ی نم‌دار پوشانده و بعد از آن نمونه‌ها را از قالب‌ها خارج کرده و آن‌ها را درون آب حاوی آهک قرار داده‌ایم تا ضمن عمل‌آوری از نشت $Ca(OH)_2$ از بتن به خارج جلوگیری شود.

جدول ۱ طرح‌های اختلاط نمونه‌های بتنی

ردیف	عنوان طرح	عیار مواد سیمانی	w/c	مواد جایگزین سیمان		مقاومت فشاری		سنین انجام آزمایش‌ها		
				نوع	درصد جایگزینی	۷ روزه	۲۸ روزه	SR	RCPT	W.P.
۱	C35/37L0	۳۵۰	۰/۳۷	Limestone	۰	۴۷/۱۶	۵۴/۷۸	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰
۲	C35/37L5	۳۵۰	۰/۳۷	Limestone	۵	۴۴/۷	۵۳/۶۸	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰
۳	C35/37L10	۳۵۰	۰/۳۷	Limestone	۱۰	۴۸/۲	۵۲/۲۷	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰
۴	C35/37L15	۳۵۰	۰/۳۷	Limestone	۱۵	۴۳/۷۶	۴۹/۵	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰
۵	C35/37L20	۳۵۰	۰/۳۷	Limestone	۲۰	۳۳/۷۷	۴۴/۵۳	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰
۶	C35/45L0	۳۵۰	۰/۴۵	Limestone	۰	۳۴/۲۶	۴۲/۹۱	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰
۷	C35/45L5	۳۵۰	۰/۴۵	Limestone	۵	۳۲/۳۶	۴۵/۱۹	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰
۸	C35/45L10	۳۵۰	۰/۴۵	Limestone	۱۰	۳۱/۰۷	۳۷/۷۸	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰
۹	C35/45L15	۳۵۰	۰/۴۵	Limestone	۱۵	۲۷/۵	۳۶/۴۵	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰
۱۰	C35/45L20	۳۵۰	۰/۴۵	Limestone	۲۰	۲۶/۴۴	۳۲/۹۸	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰
۱۱	C35/55L0	۳۵۰	۰/۵۵	Limestone	۰	۲۴	۳۳/۸۶	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰
۱۲	C35/55L5	۳۵۰	۰/۵۵	Limestone	۵	۲۲/۵۶	۳۲	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰
۱۳	C35/55L10	۳۵۰	۰/۵۵	Limestone	۱۰	۲۰/۱۵	۲۹/۳۸	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰
۱۴	C35/55L15	۳۵۰	۰/۵۵	Limestone	۱۵	۱۸/۸۲	۲۵/۶۵	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰
۱۵	C35/55L20	۳۵۰	۰/۵۵	Limestone	۲۰	۱۸/۷۴	۲۵/۷۵	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰	۲۸.۹۰.۱۸۰.۲۷۰
۱۶	C35/50P0	۳۵۰	۰/۵	Pumice	۰	۲۹	۴۳/۳	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۹۰.۱۸۰	۹۰۱۸۰
۱۷	C35/50P10	۳۵۰	۰/۵	Pumice	۱۰	۲۵/۷	۳۷/۸	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۹۰.۱۸۰	۹۰۱۸۰
۱۸	C35/50P15	۳۵۰	۰/۵	Pumice	۱۵	۲۳	۳۹	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۹۰.۱۸۰	۹۰۱۸۰
۱۹	C35/50P20	۳۵۰	۰/۵	Pumice	۲۰	۲۵/۷	۳۹/۳	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۹۰.۱۸۰	۹۰۱۸۰
۲۰	C35/50T15	۳۵۰	۰/۵	Tuff	۱۵	۴۳/۳	۴۹/۸	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۹۰.۱۸۰	۹۰۱۸۰
۲۱	C35/50T20	۳۵۰	۰/۵	Tuff	۲۰	۳۱/۸	۴۵/۵	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۹۰.۱۸۰	۹۰۱۸۰
۲۲	C35/50T25	۳۵۰	۰/۵	Tuff	۲۵	۳۴/۵	۵۰/۲	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۹۰.۱۸۰	۹۰۱۸۰
۲۳	C42/45R0	۴۲۰	۰/۴۵	RHA	۰	۳۰/۲	۴۰/۳	---	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰
۲۴	C42/45R7	۴۲۰	۰/۴۵	RHA	۷	۳۲/۴	۴۲/۸	---	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰
۲۵	C42/45R10	۴۲۰	۰/۴۵	RHA	۱۰	۳۲/۶	۴۴/۸	---	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰
۲۶	C42/45R15	۴۲۰	۰/۴۵	RHA	۱۵	۳۴/۲	۴۶/۹	---	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰
۲۷	C40/45MS0	۴۰۰	۰/۴۵	NS	۰	۳۶/۸	۵۲/۳	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۲۸.۹۰.۱۸۰	۲۸
۲۸	C40/45NS4/5	۴۰۰	۰/۴۵	NS	۴/۵	۴۶	۵۷/۸	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۲۸.۹۰.۱۸۰	۲۸
۲۹	C40/45NS7/5	۴۰۰	۰/۴۵	NS	۷/۵	۴۸	۶۲	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۲۸.۹۰.۱۸۰	۲۸
۳۰	C40/45MS4/5	۴۰۰	۰/۴۵	SF	۴/۵	۴۱/۷	۵۵/۲	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۲۸.۹۰.۱۸۰	۲۸
۳۱	C40/45MS7/5	۴۰۰	۰/۴۵	SF	۷/۵	۴۰/۷	۶۱	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۲۸.۹۰.۱۸۰	۲۸
۳۲	C40/45M0	۴۰۰	۰/۴۵	Metakaoline	۰	۳۵/۶۷	۴۶/۳۳	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰
۳۳	C40/45Ma5	۴۰۰	۰/۴۵	Metakaoline-A	۵	۳۷	۴۹/۶۶	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰
۳۴	C40/45Ma10	۴۰۰	۰/۴۵	Metakaoline-A	۱۰	۳۶/۲۷	۵۲	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰
۳۵	C40/45Ma15	۴۰۰	۰/۴۵	Metakaoline-A	۱۵	۳۵/۱۳	۵۱/۸۳	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰
۳۶	C40/45Ma20	۴۰۰	۰/۴۵	Metakaoline-A	۲۰	۲۷	۴۷/۳۳	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰
۳۷	C40/45Mb5	۴۰۰	۰/۴۵	Metakaoline-B	۵	۳۹/۳۳	۵۲/۱۶	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	---	---
۳۸	C40/45Mb10	۴۰۰	۰/۴۵	Metakaoline-B	۱۰	۳۳/۶۷	۵۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	---	---
۳۹	C40/45Mb15	۴۰۰	۰/۴۵	Metakaoline-B	۱۵	۲۷	۴۶/۶۶	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	---	---
۴۰	C40/45Mb20	۴۰۰	۰/۴۵	Metakaoline-B	۲۰	۲۴/۱۶	۴۳/۶۶	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	---	---
۴۱	C40/45Mc5	۴۰۰	۰/۴۵	Metakaoline-C	۵	۳۵/۶۶	۵۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰
۴۲	C40/45Mc10	۴۰۰	۰/۴۵	Metakaoline-C	۱۰	۳۲/۸	۴۸/۳۳	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰
۴۳	C40/45Mc15	۴۰۰	۰/۴۵	Metakaoline-C	۱۵	۲۸/۳	۴۲	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰
۴۴	C40/45Mc20	۴۰۰	۰/۴۵	Metakaoline-C	۲۰	۲۲/۵	۳۹	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰	۷.۲۸.۹۰.۱۸۰
۴۵	C45/40MS0	۴۵۰	۰/۴	SF	۰	۴۰/۲	۵۲/۸	۷.۲۸.۴۲.۹۰	۷.۲۸.۴۲.۹۰	۷.۲۸.۹۰
۴۶	SCC45/40MS0	۴۵۰	۰/۴	SF	۰	۴۶/۸	۵۶/۷	۷.۲۸.۴۲.۹۰	۷.۲۸.۴۲.۹۰	۷.۲۸.۹۰
۴۷	SCC45/40MS7/5	۴۵۰	۰/۴	SF	۷/۵	۴۸/۷	۶۵/۹	۷.۲۸.۴۲.۹۰	۷.۲۸.۴۲.۹۰	۷.۲۸.۹۰
۴۸	SCC45/40MS7/5	۴۸۰	۰/۴	SF	۷/۵	۵۱/۷	۶۹/۵	۷.۲۸.۴۲.۹۰	۷.۲۸.۴۲.۹۰	۷.۲۸.۹۰
۴۹	SCC45/40P15	۴۵۰	۰/۴	Pumice	۱۵	۳۶/۷	۴۶/۵	۷.۲۸.۴۲.۹۰	۷.۲۸.۴۲.۹۰	۷.۲۸.۹۰
۵۰	SCC45/40P15	۵۱۵	۰/۴	Pumice	۱۵	۴۸/۲	۵۸/۲	۷.۲۸.۴۲.۹۰	۷.۲۸.۴۲.۹۰	۷.۲۸.۹۰
۵۱	SCC45/40R10	۴۵۰	۰/۴	RHA	۱۰	۴۲/۲	۵۵/۹	۷.۲۸.۴۲.۹۰	۷.۲۸.۴۲.۹۰	۷.۲۸.۹۰
۵۲	SCC45/40R10	۴۹۵	۰/۴	RHA	۱۰	۴۷/۲	۶۱/۳	۷.۲۸.۴۲.۹۰	۷.۲۸.۴۲.۹۰	۷.۲۸.۹۰
۵۳	C25/45	۲۵۰	۰/۴۵	---	---	۴۹/۷۵	۶۵/۲۵	۷.۲۸	۷.۲۸	۷.۲۸
۵۴	C25/55	۲۵۰	۰/۵۵	---	---	۳۶	۵۲/۵	۷.۲۸	۷.۲۸	۷.۲۸
۵۵	C25/60	۲۵۰	۰/۶	---	---	۲۹	۴۲/۲۵	۷.۲۸	۷.۲۸	۷.۲۸
۵۶	C30/45	۳۰۰	۰/۴۵	---	---	۴۶	۶۱/۹	۷.۲۸	۷.۲۸	۷.۲۸
۵۷	C30/55	۳۰۰	۰/۵۵	---	---	۳۱	۴۶/۶۵	۷.۲۸	۷.۲۸	۷.۲۸
۵۸	C30/60	۳۰۰	۰/۶	---	---	۱۸/۶۵	۳۵/۲۵	۷.۲۸	۷.۲۸	۷.۲۸
۵۹	C35/45	۳۵۰	۰/۴۵	---	---	۳۶/۵	۵۴	۷.۲۸	۷.۲۸	۷.۲۸
۶۰	C35/55	۳۵۰	۰/۵۵	---	---	۲۳/۷۵	۴۲/۶	۷.۲۸	۷.۲۸	۷.۲۸
۶۱	C35/60	۳۵۰	۰/۶	---	---	۱۷/۳	۳۳/۷۵	۷.۲۸	۷.۲۸	۷.۲۸
۶۲	C42/45	۴۲۵	۰/۴۵	---	---	۳۲/۲۵	۴۶/۵	۷.۲۸	۷.۲۸	۷.۲۸
۶۳	C42/55	۴۲۵	۰/۵۵	---	---	۲۰/۷۵	۳۶/۷۵	۷.۲۸	۷.۲۸	۷.۲۸
۶۴	C42/60	۴۲۵	۰/۶	---	---	۱۴/۱	۲۸/۲۵	۷.۲۸	۷.۲۸	۷.۲۸
۶۵	C32/50MS0	۳۲۵	۰/۵	SF	۰	---	۲۸/۳۵	۲۸	۲۸	۲۸
۶۶	C32/50MS7/5	۳۲۵	۰/۵	SF	۷/۵	---	۳۴/۶۵	۲۸	۲۸	۲۸
۶۷	C40/50MS0	۴۰۰	۰/۵	SF	۰	---	۲۳/۱	۲۸	۲۸	۲۸
۶۸	C40/50MS7/5	۴۰۰	۰/۵	SF	۷/۵	---	۳۲/۵۵	۲۸	۲۸	۲۸
۶۹	C32/40MS0	۳۲۵	۰/۴	SF	۰	---	۴۸/۳	۲۸	۲۸	۲۸
۷۰	C32/40MS7/5	۳۲۵	۰/۴	SF	۷/۵	---	۴۳/۰۵	۲۸	۲۸	۲۸
۷۱	C40/40MS0	۴۰۰	۰/۴	SF	۰	---	۳۳/۶	۲۸	۲۸	۲۸
۷۲	C40/40MS7/5	۴۰۰	۰/۴	SF	۷/۵	---	۴۰/۹۵	۲۸	۲۸	۲۸

جدول ۲ ساختار شیمیایی مواد سیمانی مورد استفاده

Chemical Components	Cement Type I	RHA	Tuff	Pumice	Silica Fume	Limestone	Metakaolin		
							A	B	C
SiO_2	۲۱/٥	۸۹/٦۱	٦٥/۷٤	٦۷/۷	۹٤/٦٦	۱/٤۷	۷۲/٥	۷٦/۷۳	٦۸/۹۹
Al_2O_3	۳/٦۸	۰/۰٤	۱۲/۲٤	۱٥/۸	۰/۳۱	۰/۲۲	۲۲/۲۱	۱۷/٤۱	۲۰/٤٦
Fe_2O_3	۲/۷٦	۰/۲۲	۲/۰٥	۳/۳۹	۰/٦۰	۰/۲۹	۰/۸۱	۰/٥۹	۰/۹۹
CaO	٦۱/٥	۰/۹۱	۲/۸۷	۳/۹	۰/۳٦	٥٤/۷۷	۲/۲۲	۳/٥۸	۲/۷٥
SO_3	۲/٥	۰/۱٥	۰	۰/۳۳	۰/۲۳	۰/۰٦	----	----	----
MgO	٤/۸	۰/٤۲	۰/۹٦	۰/۹۹	۰/۷۸	۰/۳	۰/۱۳	۰/۱۹	۰/٥۰
Na_2O	۰/۱۲	۰/۰۷	۱/۹۲	۲/۹٥	۰/۲۲	۰/۰٥	۰/۰٥	۰/۰٥	۲/۸۰
K_2O	۰/۹٥	۱/٥۸	۲/۰۲	۲	۰/۲۲	۰/۰۸	۰/٥٥	۰/۳۱	۲/۲٤
P_2O_5	۰/۲۳	۰/٤۱	۰/۰۳	۰/۱۲	----	۰/۰۱	۰/۰٥	۰/۰٤	۰/۰٥
TiO_2	۰/۰٤	۰/۰۲	۰/۲۹	۰/۳۳	----	۰/۰٥	۰/۰٦	۰/۰٦	۰/۰۹
LOI	۱/۳٥	٥/۹۱	۸/٥	۲/۳	۱/۷۷	٤۲/۲۳	۰/۷٦	۰/۸۲	۰/۸۹

برای آزمایش مقاومت فشاری از نمونه‌های مکعبی ۱۰۰ میلی‌متری استفاده شد. هم‌چنین از آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار طبق استاندارد BS EN-12390-8 برای ارزیابی نفوذپذیری بتن استفاده شد. در این روش یک وجه نمونه‌ی مکعبی ۱٥۰ میلی‌متری، تحت آب با فشار ۰/٥ مگا پاسکال قرار داده می‌شود. این فشار برای ۷۲ ساعت اعمال می‌شود. پس از اتمام، نمونه‌ها از دستگاه خارج و به ۲ نیم تقسیم می‌شوند. سپس، با توجه به پروفیل نفوذ آب به بتن، حداکثر عمق نفوذ آب ثبت می‌شود و به‌عنوان شاخصی برای نفوذپذیری بتن در نظر گرفته می‌شود. لازم به تذکر است، برای هم‌گرایی بیش‌تر نتایج، در این تحقیق از میانگین عمق نفوذ استفاده شده است.

برای اندازه‌گیری مقاومت الکتریکی سطحی بتن از دستگاه Wenner چهار الکترودی با فواصل مساوی ٥۰ میلی‌متر استفاده شد. نمونه‌های استوانه‌ای ۱۰۰ × ۲۰۰ میلی‌متری اشباع برای هر سن به‌کار رفت. چهار قراءت بر روی محیط نمونه‌ها انجام شده و میانگین آن‌ها در نظر گرفته شد [19].

آزمایش نفوذ سریع یون کلراید بر اساس استاندارد ASTM C1202 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای به قطر ۱۰۰ و ضخامت ٥۰ میلی‌متر انجام شد. بر طبق استاندارد، نمونه‌ها در معرض ولتاژ ٦۰ ولت برای مدت ٦ ساعت قرار گرفتند و میزان کل بار عبوری در این مدت محاسبه شد. این عدد به‌عنوان شاخصی برای طبقه‌بندی بتن از لحاظ مقاومت در مقابل نفوذ یون کلراید در نظر گرفته می‌شود.

نتایج آزمایش‌ها و تجزیه و تحلیل آن‌ها

مقاومت الکتریکی و رسانایی، هر دو، جزو خواص فیزیکی مواد هستند که می‌توانند برای ارزیابی کیفیت بتن در ارتباط با دوام مورد استفاده قرار گیرند. تحقیق‌های بسیاری در ارتباط بین مقاومت الکتریکی و نفوذپذیری بتن در مقابل یون کلراید و خوردگی آرماتور انجام شده است [14,15]. از نتایج آشکار است که ارتباط مؤثری بین مقاومت الکتریکی بتن و نفوذ پذیری آن برقرار است. مقاومت الکتریکی بتن بیانگر جابه‌جایی یون‌ها -از جمله یون کلراید- درون مایع منفذی بتن می‌باشد. بنابراین انتظار می‌رود ارتباط منطقی بین مقاومت الکتریکی و نفوذپذیری بتن در مقابل یون کلراید وجود داشته باشد. اگر مقاومت الکتریکی بتن زیاد باشد جابه‌جایی یون‌های کلراید در

بتن آهسته می‌باشد و آرماتورهای مدفون در بتن دیرتر دچار خوردگی می‌شوند و در نتیجه سازه دوام بالاتری دارد و عمر مفید آن افزایش می‌یابد. نتایج آزمایش‌های Polder [20] نشان می‌دهد رابطه‌ای خطی بین مقاومت الکتریکی و احتمال خوردگی در نمونه‌های بتنی وجود دارد.

از سوی دیگر، محدودیت‌هایی در ارتباط بین خاصیت رسانایی بتن با نفوذپذیری آن وجود دارد. رسانایی نمونه‌های بتنی ($\sigma_{specimen}$) طبق رابطه‌ی (۱)، به دو عامل خصوصیات ریزساختار منافذ مویین (F) و رسانایی مایع منفذی ($\sigma_{poresoln}$) وابسته است :

$$\sigma_{specimen} = \sigma_{poresoln} / F \qquad (۱)$$

بنابراین، بتنی که با سیمان با پایه‌ی قلیاییت پایین ساخته شده باشد، نسبت به نمونه بتنی که دارای قلیاییت بالاتری باشد، حتی اگر دارای ساختار منافذ مویین یکسانی باشند، رسانایی کم‌تری از خود نشان می‌دهد. این موضوع یکی از محدودیت‌های روش‌های رسانایی در ارزیابی خاصیت نفوذپذیری بتن‌ها می‌باشد[6, 21]. در نتایج آزمایش‌های RCPT و مقاومت الکتریکی سطحی (SR) مشاهده شد میزان بار عبوری و مقاومت الکتریکی نمونه‌های بتنی حاوی مواد پوزولانی نسبت به نمونه‌های شاهد، تا ٤ الی ٥ برابر بهبود یافتند که این نسبت در بهبود عملکرد این بتن‌ها کم‌تر می‌باشد. به‌علاوه، Shi [23] در تحقیقی تأثیر دوده‌ی سیلیس را بر رسانایی نمونه‌های بتنی بررسی کرده و به این نتیجه رسیده است که ممکن است رسانایی نمونه‌های حاوی دوده‌ی سیلیس نسبت به نمونه‌ی شاهد تا ۹۰٪ کاهش یابد.

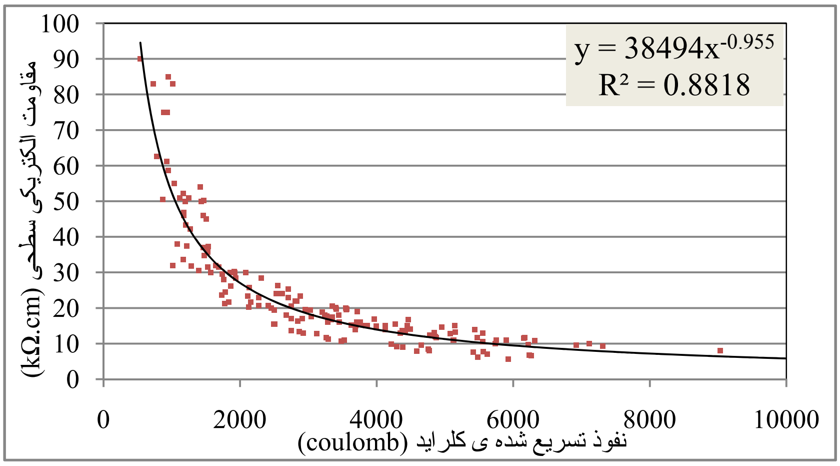
از آن‌جایی که رسانایی نمونه‌های بتنی تا حدودی به ساختار منافذ مویین بستگی دارد و بیش‌تر به ساختار شیمیایی مایع منفذی وابسته است، نتایج به‌دست آمده به‌درستی بیانگر جابه‌جایی یون‌های کلراید در بتن نمی‌باشد [22]. برای مثال یون‌های OH^- دارای قابلیت انتقال بیش‌تری نسبت به یون‌های کلراید می‌باشد (جدول ۳). در نتیجه، اگر ترکیب شیمیایی مایع منفذی بتن دارای یون‌های OH^- زیادی باشد، تأثیر این یون‌ها در انتقال جریان بیش‌تر از یون‌های کلراید می‌باشد. این امر باعث می‌گردد که رسانایی نمونه‌ها بالا رفته و بتن به اشتباه در سطح بتن‌های با نفوذ پذیری بالای یون کلراید قرار گیرد.

جدول ۳ جدول مقایسه‌ی رسانایی یون‌های Cl^- و OH^- [۲۲]

ردیف	یون	میزان رسانایی
۱	Cl^-	۰/۰۰۷۵۲۳ $\Omega^{-1}m^2$
۲	OH^-	۰/۰۱۹۸۰۰ $\Omega^{-1}m^2$

در طول آزمایش RCPT به‌دلیل ولتاژ نسبتاً بالای ٦۰ ولت و مدت زمان نسبتاً طولانی ٦ ساعت، دمای نمونه‌ها افزایش یافت که این افزایش دما باعث زیاد شدن جریان و در نتیجه مجموع بار عبوری بالاتر می‌شود. مخصوصاً در بتن‌های با آب به سیمان بالا، این افزایش دما ممکن است به ریزساختار بتن آسیب رسانده و ساختار شیمیایی مایع منفذی را تغییر داده و بتن را از حالت اولیه خارج سازد. از طرفی، با توجه به وسعت استفاده از آزمایش RCPT ایده‌ی جایگزینی این آزمایش با آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی مطلوب به نظر می‌رسد. به بیان دیگر تغییر در نحوه‌ی قراءت داده‌ها (رسانایی به‌جای مجموع بار عبوری)، می‌تواند گزینه‌ای مناسب برای جایگزینی روش RCPT به‌شمار آید. روشن است که در صورت این جایگزینی باید ارتباط بین مقاومت الکتریکی سطحی بتن با مجموع بار عبوری در روش RCPT بررسی و تأیید شود.

با فرض ثابت بودن رسانایی نمونه‌های بتنی در طول آزمایش و بر اساس اصول فیزیکی آزمایش‌های RCPT و SR، می‌توان نتیجه گرفت که رابطه‌ای خطی بین نتایج این دو آزمایش باید برقرار باشد. اما در این تحقیق رابطه‌ی توانی($y=ax^b$) با دقت بالا (R^2=۰/۸۸) بین نتایج این دو آزمایش برای مجموعه وسیعی از نمونه‌ها به‌دست آمد (شکل ۱).



شکل ۱ ارتباط بین نتایج آزمایش‌های RCPT و مقاومت الکتریکی سطحی برای تمامی نمونه‌ها

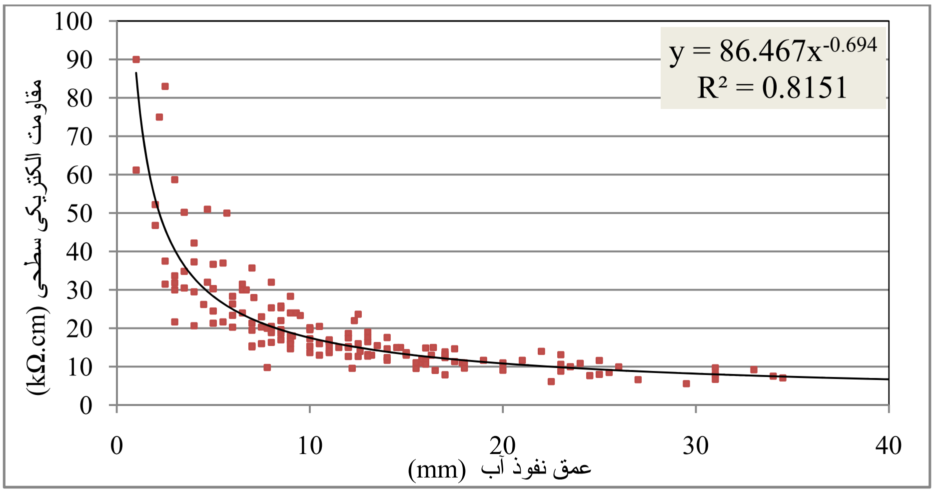
به‌دلیل افزایش دما در طول آزمایش RCPT مقاومت الکتریکی نمونه‌ها کاهش می‌یابد و میزان جریان عبوری در طول آزمایش زیاد می‌شود. در نتیجه رابطه‌ی به‌دست آمده از حالت خطی خارج می شود و هرچه رسانایی و نفوذپذیری بیش‌تر باشد، توان رابطه‌ی (b)، کم‌تر می‌شود.

بر اساس تحقیقات Betacourt و Hooton [24]، اگر دمای نمونه‌ها در طول آزمایش RCPT ثابت نگه داشته شود، رابطه‌ای خطی بین رسانایی نمونه‌ها و مجموع بار عبوری با ضریب R^2 برابر ۰/۹۸ به‌دست می‌آید. هم‌چنین آن‌ها پیشنهاد قراءت رسانایی نمونه‌ها را پس از یک دقیقه از شروع آزمایش RCPT، به‌جای قرائت مجموع بار عبوری پس از ٦ ساعت به‌عنوان تصحیحی بر روش RCPT داده‌اند.

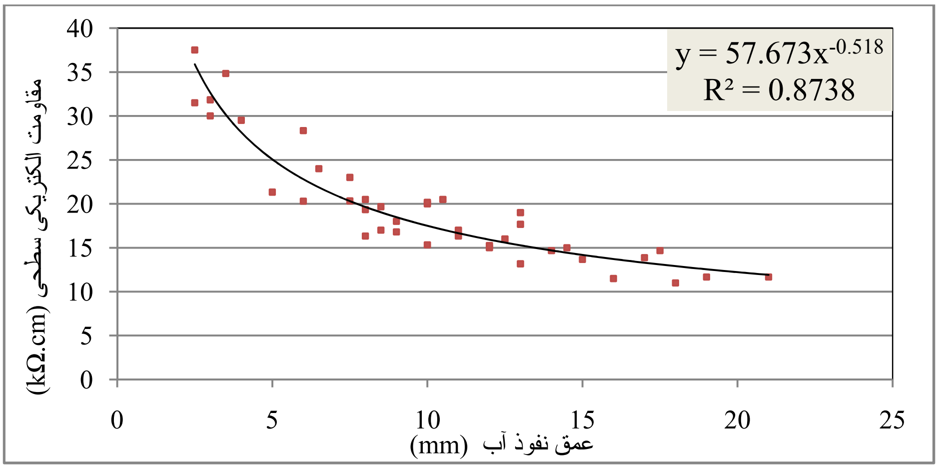
یکی از عوامل اصلی دوام بتن، نفوذپذیری آن می‌باشد. در این تحقیق آزمایش عمق نفوذ آب تحت فشار بر اساس BS-EN:12390-8 برای ارزیابی نفوذپذیری بتن مورد استفاده قرار گرفت. همان‌طور که در شکل (۲) مشاهده می‌شود، رابطه‌ای کلی بین مقاومت الکتریکی بتن و عمق نفوذ آب وجود دارد.

همان‌طور که در شکل‌های(۵-۳) مشخص است در مورد نمونه‌هایی که از یک نوع مواد سیمانی ساخته شده‌اند رابطه‌ی خوبی به‌دست می‌آید. ولی وقتی مجموعه‌ی نمونه‌های مورد بررسی از مواد سیمانی مختلفی ساخته شده باشند از دقت این رابطه کاسته می‌شود. دلیل این امر را می‌توان این گونه بررسی کرد که نتایج آزمایش SR به دو عامل ریز ساختار منافذ مویین بتن و رسانایی مایع منفذی آن بستگی دارد اما نتایج آزمایش عمق نفوذ آب فقط به عامل ریز ساختار منافذ مویین بستگی دارد. در بتن‌های ساخته شده با سیمان‌های آمیخته با پوزولان‌های مختلف، ساختار شیمیایی مایع منفذی دچار تغییرات زیادی می‌شود و رسانایی مایع منفذی بسیار متفاوت است و پراکندگی نتایج SR و نفوذ، بالا می‌رود و دقت رابطه‌ی به‌دست آمده کم می‌شود. اما در مورد نمونه‌هایی که در آن‌ها از یک نوع مواد سیمانی استفاده شده باشد، به‌دلیل شباهت ترکیب شیمیایی مایع منفذی آن‌ها با هم، نتایج بیش‌تر به ساختار منافذ مویین حساس است و نتایج دو آزمایش SR و عمق نفوذ آب رابطه‌ی مناسبی با هم پیدا می‌کنند.

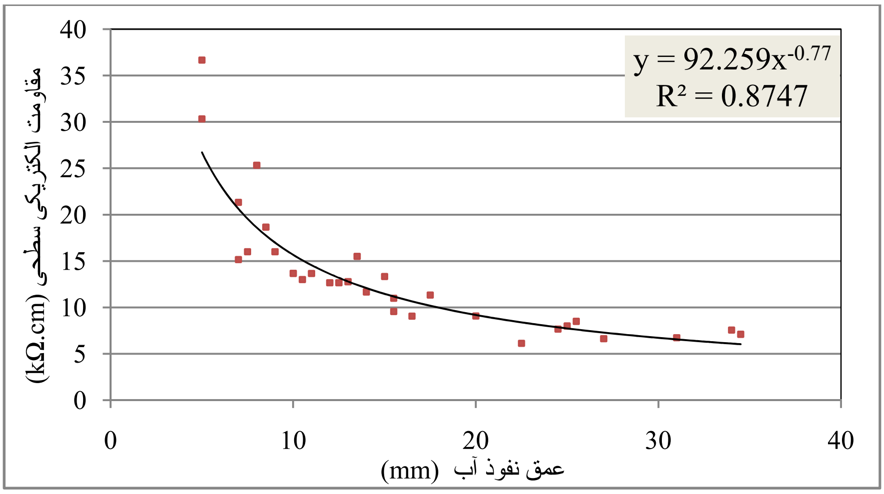
در انتها، با استفاده از روابط به‌دست آمده، دو مدل برای پیش‌بینی نتایج آزمایش‌های RCPT و عمق نفوذ آب تحت فشار، در جدول (٤) ارائه گردیده است. لازم به ذکر است، کارهای انجام‌شده‌ی قبلی که در منابع نیز آورده شده است [13,15,24]، بیش‌تر به مکانیزم‌های موجود و تأثیر پارامترها پرداخته‌اند و در مواردی که روابطی آورده شده است، این روابط در مورد طرح‌های اختلاط محدودی بوده و دارای کلیت نمی‌باشند. ولی در این تحقیق، همان‌طور که ذکر گردید، از طرح‌های اختلاط متنوع و وسیعی برای به‌دست آوردن روابط استفاده شده است. هم‌چنین، در مورد ارتباط مقاومت الکتریکی و عمق نفوذ آب تحت فشار، می‌توان گفت این تحقیق منحصر به فرد می‌باشد.



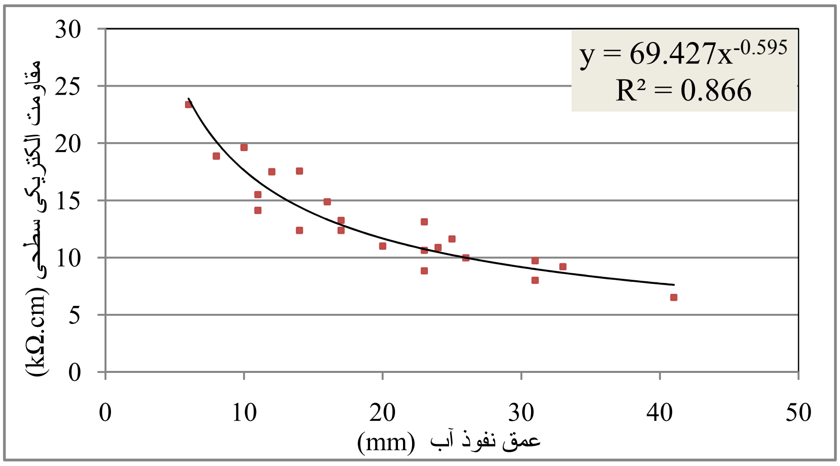
شکل ۲ ارتباط بین نتایج آزمایش‌های نفوذ آب و مقاومت الکتریکی سطحی برای تمامی نمونه‌ها



شکل ۳ ارتباط بین نتایج آزمایش‌های نفوذ آب و مقاومت الکتریکی سطحی برای نمونه‌های حاوی پودر سنگ آهک



شکل ٤ ارتباط بین نتایج آزمایش‌های نفوذ آب و مقاومت الکتریکی سطحی برای نمونه‌های حاوی متاکائولن



شکل ٥ ارتباط بین نتایج آزمایش‌های نفوذ آب و مقاومت الکتریکی سطحی برای نمونه‌های حاوی سیمان پرتلند

جدول ٤ مدل‌های پیشنهادی برای پیش‌بینی نفوذپذیری بتن با استفاده از مقاومت الکتریکی سطحی

ردیف	مدل پیشنهادی	R^2	توضیحات
۱	$RCP = 43618(SR)^{-0/923}$	R^2 = ۰/۸۸	SR: Surface Resistivity[KΩ_Cm], RCP: charge pass through the specimen[coulomb]
۲	$Depth = 287/12(SR)^{-1/174}$	R^2 = ۰/۸۱	SR: Surface Resistivity[KΩ_Cm], Depth: depth of water penetration[mm]

نتیجه گیری

با توجه به وابستگی نتایج آزمایش‌های RCPT و مقاومت الکتریکی سطحی به رسانایی نمونه‌های بتنی، از لحاظ تئوری نتایج این آزمایش‌ها با یکدیگر همبستگی دارند. هم‌چنین، به‌صورت تجربی نیز روابط بین نتایج این دو آزمایش در بازه‌ی وسیعی از طرح‌های اختلاط مورد بررسی قرار گرفت و رابطه‌ی توانی با دقت بالا (R^2=۰/۸۸) به‌دست آمد.

از طرفی، با توجه به تأثیر ریزساختار منافذ مویین بر رسانایی بتن، رابطه‌ی خوبی با دقت ۰/۸۱= R^2، بین نتایج آزمایش‌های مقاومت الکتریکی سطحی و عمق نفوذ آب تحت فشار، در بازه‌ی وسیعی از طرح‌های اختلاط به‌دست آمد. هم‌چنین در مورد طرح‌های اختلاط ساخته‌شده با یک نوع مواد سیمانی، دقت این رابطه بهبود یافت.

بر اساس شکل‌های (۵-۱)، به‌نظر می‌رسد در مورد نمونه‌های بتنی با نفوذپذیری کم‌تر (RCPT کم‌تر از ۱۵۰۰ کلمب و عمق نفوذ کم‌تر از ۱۰ میلی‌متر)، مقاومت الکتریکی بتن حساسیت بیش‌تری نسبت به تغییرات نفوذپذیری دارد و تغییرات آن را به‌خوبی نشان می‌دهد.

با توجه به نتایج به‌دست آمده و مزایای آزمایش مقاومت الکتریکی سطحی، می‌توان این آزمایش را جایگزینی برای آزمایش RCPT و شاخصی مناسب برای ارزیابی نفوذپذیری بتن در نظر گرفت. در انتها، با استفاده از روابط به‌دست آمده، دو مدل برای پیش‌بینی نتایج آزمایش‌های RCPT و عمق نفوذ آب تحت فشار ارائه گردید.

قدردانی

از همکاران در مرکز تحقیقات تکنولوژی و دوام بتن دانشگاه صنعتی امیرکبیر به‌علت فراهم نمودن امکان ساخت و آزمایش‌های مختلف سپاسگزاری می‌گردد.

مراجع

1. Ramezanianpour, A. A., Pilvar, A.R., Mahdikhani, M., Moodi, F., "Practical Evaluation Of Relationship Between Concrete Resistivity, Water Penetration, Rapid Chloride Penetration And Compressive Strength", *Construction and Building Materials*, vol. 25, pp. 2472–2479, (2011).
2. Mc Carter, WJ., Emerson, M., Ezirim, H., "Properties of concrete in the cover zone: developments in monitoring techniques", *Magazine of Concrete Research*, vol. 47 (172): pp. 243–51, (1995).
3. Suryavanshi, AK., Swamy, RN., Cardew GE., "Estimation of diffusion coefficients for chloride ion penetration into structural concrete", *ACI Materials Journal*; vol. 99(5): pp.441–9, (2002).
4. Dhir, RK., Jones, MR., Ahmed, HEH., Seneviratne, AMG., "Rapid estimation of chloride diffusion coefficient in concrete", *Magazine of Concrete Research*, vol. 42(152): pp. 177–85, (1990).
5. Streicher, PE., Alexander, MG., "A critical evaluation of chloride diffusion test methods for concrete", In: Proceedings of the third CANMET/ACI international conference on concrete durability, Nice, France,. pp. 517–30, (1994).
6. Whiting, D., "Rapid measurement of the chloride permeability of concrete", Public Roads 45 (3), pp.101– 112, (1981).
7. Whiting, D., Mitchell, T.M., "History of the rapid chloride permeability test", Transportation Research Board, 1335, pp.55– 62, (1992).
8. ASTM C1202, "Standard test method for electrical indication of concrete’s ability to resist chloride ion penetration", (2012).

9. Hale, M., Russell, BW., Bush, TD., "An assessment of the rapid chloride ion penetrability test", In: Proceedings of the international conference on concrete for extreme conditions, Scotland, UK: University of Dundee; pp. 447–56, (2002).
10. Gowripalan, N., Mohamed, HM., "Chloride-ion induced corrosion of galvanized and ordinary steel reinforcement in high-performance concrete", *Cement Concrete Research*; vol. 28(8): pp. 1119–31, (1998).
11. Sharfuddin, A., Kayali, O., Anderson, W., "Chloride penetration in binary and ternary blended cement concretes as measured by two different rapid methods", *Cement and Concrete Composites*, vol. 30(7), pp. 576-58, (2008).
12. Polder Rob, B., Peelen Willy, H. A, "Characterisation of chloride transport and reinforcement corrosion in concrete under cyclic wetting and drying by electrical resistivity", Cement & concrete composite, vol. 24(5), pp. 427-435, (2002).
13. Gulikers, J., "Theoretical considerations on the supposed linear relationship between concrete resistivity and corrosion rate of steel reinforcement", *Materials and Corrosion*, 56, No. 6, pp.393-403, (2005).
14. Andrade, C., Sanjuan, MA., Alonso, MC., "Measurement of chloride diffusion coefficient from migration tests", Proceedings of the NACE Corrosion'93, pp.289-298, (1993).
15. Polder, RB., "Chloride diffusion and resistivity testing of five concrete mixes for marine environment", Proceedings of the RILEM International Workshop on Chloride Penetration into Concrete, St-Remy-les-Chevreuses, RILEM, (1997).
16. Kessler Richard, J., Powers Rodney, G., Vivas, E., Paredes Mario, A., Virmani Paul, Y., "surface resistivity as an indicator of concrete chloride penetration resistance", Proceedings of the Concrete Bridge Conference, (2008).
17. Ramezanianpour, A.A., Mahdikhani, M., Ahmadibeni, G., "The effect of rice husk ash on mechanical properties and durability of sustainable concretes", *International Journal of Civil Engineering 7 (2)*, pp. 83-91, (2009).
18. BS EN-12390-8, "Depth of penetration of water under pressure", British Standards Institution, (2000).
19. FM 5-578, "Florida Method of Test for Concrete Resistivity as an Electrical Indicator of its Permeability", (2004).
20. Polder, R. B., "Critical chloride content for reinforced concrete and its relationship to concrete resistivity", *Materials and corrosion*, Vol. 60 (8),pp. 623 – 630, (2009).
21. Snyder, KA., Ferraris, CF., Martys, NS., Garboczi, EJ., "Using impedance spectroscopy to assess the viability of the rapid chloride test for determining concrete conductivity", *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*; vol. 105(4), pp. 497–509, (2006).

22. Willfried, k., "Rapid chloride permeability testing, a critical review", proceedings of the concrete in hot and aggressive environments, pp. 147-156, (2008).
23. Shi C., Stegemann Julia, A., Caldwell Robert, J., "ffect of Supplementary Cementing Materials on the Specific Conductivity of Pore Solution and its implications on the rapid chloride permeabilitybtest results", title No. 95-M36, *ACI Materials Journal*, pp. 389-394, (1998).
24. Julio-Betancourt, G.A., Hooton, R.D, "Study of the Joule effect on rapid chloride permeability values and evaluation of related electrical properties of concretes", *Cement and Concrete Research*, Vol. 34(6), pp. 1007-1015, (2004).